

**Э.Б. Абубакиров, Ю.М. Гузнов, Г.Г. Денисов, Н.А. Завольский,
В.Е. Запевалов, С.А. Запевалов, О.П. Планкин, Р.М. Розенталь,
А.С. Седов, Е.С. Семенов, А.В. Чирков, А.С. Шевченко**
Институт прикладной физики РАН

Состояние работ по проекту релятивистского гиротрона диапазона 94 ГГц с выходной мощностью 5-10 МВт

Представлены результаты проектирования релятивистского гиротрона 3 мм диапазона длин волн, запитываемого винтовым электронным пучком с энергией 250 кэВ, током 80 А, пич-фактором 1.3, длительностью 0.5-1 нс с расчетной выходной мощностью 5-10 МВт при КПД 35-40%. Дано описание основных компонент прибора: электронно-оптической системы, пространства электронно-волнового взаимодействия, квазиоптической системы вывода СВЧ излучения.

Ключевые слова: релятивистский гиротрон, мощное миллиметровое излучение

Излучение мультимегаваттного уровня мощности миллиметрового диапазона представляет интерес для таких задач, как запитка ускорителей со сверхвысоким темпом ускорения (1 и более ГэВ/м), радиолокационных систем, систем накачки для рассеяния волн на релятивистских электронных потоках [1]. В миллиметровом диапазоне накоплен значительный опыт создания гиротронов с энергией электронов 70-100 кэВ, однако возможности таких приборов по наращиванию выходной мощности настоящее время близки к пределу [2]. Так, максимальный уровень мощности, достигнутый в слабoreлятивистских гиротронах, на текущий момент составляет 2.2 МВт [3]. Естественным способом повышения мощности до уровней 5 МВт и более является увеличение энергии частиц винтового электронного пучка гиротрона, то есть переход в релятивистскую область энергий.

Повышение энергии электронов, в целом, негативным образом сказывается на эффективности гиротрона. Долгое время считалось, что КПД гиротронов в релятивистской области на практике ограничен уровнем 20-30%. Однако детальный численный анализ показал, что за счет оптимизации профиля резонатора даже в сильно-релятивистских гиротронах достигим КПД на уровне 35-45%, при этом в практически значимой области умеренно-релятивистской энергии частиц с $\gamma \sim 1.5-2.5$ эффективность может достигать значений 50% и более [4]. Экспериментально это было подтверждено путем реализации в ИПФ РАН релятивистских гиротронов на частотах 9.2 и 30 ГГц с рекордными значениями уровня мощности (~ 10 МВт) и КПД ($\sim 50\%$) [5,6]

Успех в реализации данных приборов predetermined постановку задачи создания гиротрона с аналогичными характеристиками в W-диапазоне частот. Новый гиротрон создается на основе электронного ускорителя "Сатурн-F", позволяющего формировать винтовой электронный пучок с энергией до 500 кэВ, током до 200 А и частотой повторения до 10 Гц. Расчетные значения рабочего магнитного поля позволяют использовать типовой криомагнит, применяемый в слабoreлятивистских гиротронах диапазона 140-170 ГГц. Принципиальная схема гиротрона представлена на рис.1. Внешний вид катодного-анодного узла и криомагнита представлены на рис.2.

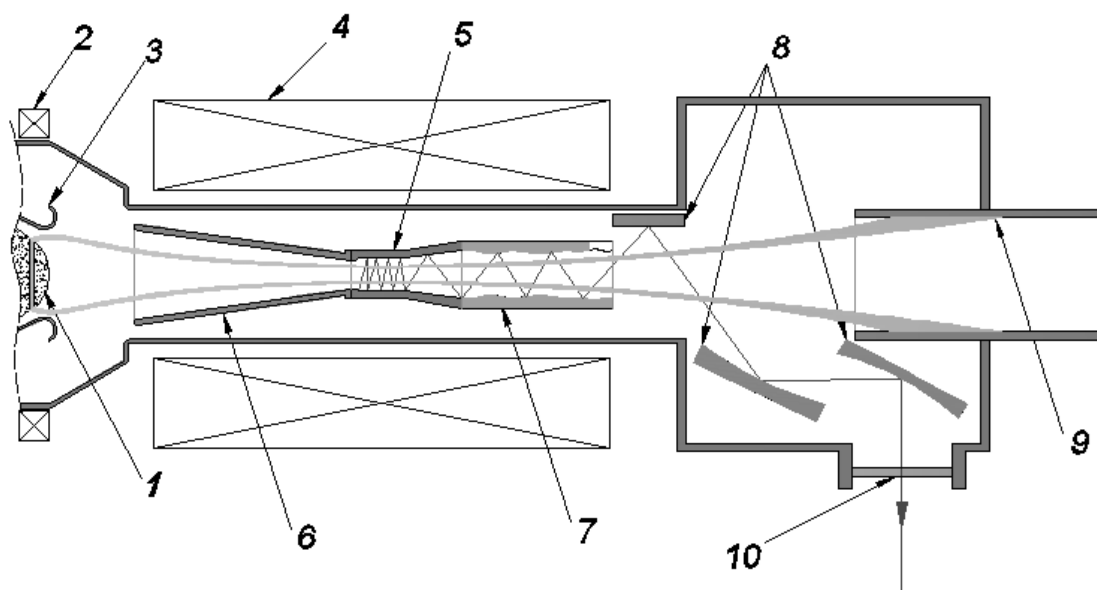


Рисунок 1. Принципиальная схема релятивистского гиротрона на частоту 94.4 ГГц: (1) – катод, (2) – корректирующий соленоид, (3) – анод, (4) – криомагнит, (5) – резонатор, (6) – канал транспортировки пучка, (7) – излучатель рабочей волны, (8) – зеркала квазиоптического преобразователя, (9) – коллектор, (10) – выходное окно.

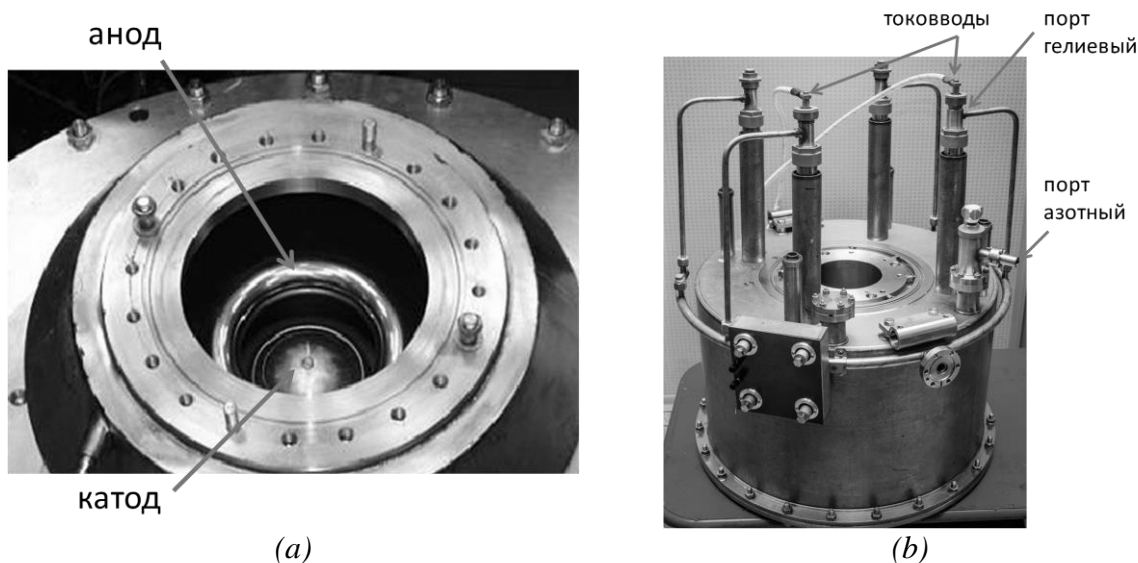


Рисунок 2. Внешний вид катодно-анодного узла (a) и криомагнита (b).

Магнетронно-инжекторная пушка построена по трехэлектродной схеме, в которой напряжение на первом аноде формируется из полного ускоряющего напряжения с помощью активного делителя. Используется импрегнированный алюминатно-бариевый катод с рабочей температурой 1050-1100 °С. Оптимизация параметров винтового электронного пучка осуществлялась программным комплексом ANGEL (ANalyzer of a Gyrating Electrons), основанном на традиционных алгоритмах анализа электронно-оптических систем методами трубок тока и дискретных источников [7, 8]. Согласно расчетам, при ускоряющем напряжении

250 кВ возможно формирование винтового электронного пучка с питч-фактором 1.3, током 80-100 А и приемлемой величиной относительного разброса поперечных скоростей 20-25%.

Обладая определенной свободой в выборе рабочей моды, было принято решение ориентироваться на хорошо отработанные в данном частотном диапазоне решения. Выбор был сделан в пользу моды $TE_{12,5}$, ранее применявшейся в качестве рабочей, к примеру, в непрерывном 200 кВт гиротроне диапазона 84 ГГц [9]. При оптимизации профиля резонатора, наряду с основной задачей повышения эффективности электронно-волнового взаимодействия, решалась задача минимизации переизлучения рабочей моды в другие моды. В ранее реализованных релятивистских гиротронах сантиметрового диапазона, в силу относительно низких значений индексов мод (TE_{01} , TE_{53}), было допустимым использование резонаторов, выход которых представлял собой сочетание нескольких (двух или трех) конусов. Однако на длине волны 3 мм на "изломах" между конусами происходит значительное переизлучение рабочей моды в моды с другими поперечными индексами. К примеру, для простейшего выходного профиля в виде конического расширения в паразитные моды переизлучается около 5% мощности [10]. В этой связи применяется более сложная технология изготовления, при которой профиль перехода между резонатором и выходным излучателем задается в виде совокупности дуг окружностей с плавными переходами. В результате проведенной оптимизации профиля перехода удастся кардинально уменьшить переизлучения до уровня порядка 0.1%. На рис.3 представлены расчётные зависимости КПД от ведущего магнитного поля для тока пучка 80 А и зависимость максимальной мощности генерации от тока пучка.

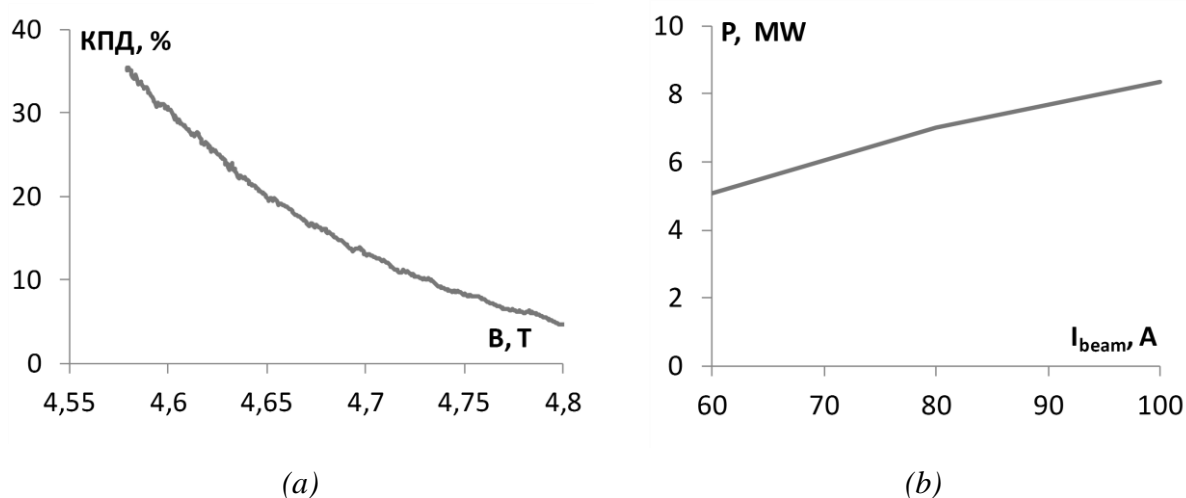


Рисунок 4. Зона генерации по магнитному полю для тока пучка 80 А (а) и зависимость максимальной выходной мощности от тока пучка (b) ($U_0=250$ кВ, $g=1.3$).

Вывод излучения будет осуществляться располагаемым в вакуумном объеме квазиоптическим преобразователем излучения рабочей моды в гауссов пучок. Преобразователь, с расчетной величиной потерь не превышающей 5%, построен по традиционной схеме (см., например, [11]), включающей излучатель рабочей волны $TE_{12,5}$ в свободное пространство, квазипараболическое зеркало и два поворотных зеркала. Выходное окно с апертурой 63.5 мм изготавливается из керамики на основе нитрида бора с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = \epsilon_w(1 + i \tan \delta)$, $\epsilon_w \approx 4.6$, $\tan \delta \sim 10^{-3}$.

Нижеприведенная таблица суммирует основные проектные параметры гиротрона.

Таблица 1.

Ускоряющее напряжение	250 кВ
Напряжение анод-катод	120-160 кВ
Ток пучка	80-100 А
Питч-фактор	1.3
Длительность импульса	0.5-1 мкс
Рабочая частота	94.4 ГГц
Рабочая мода	TE _{12,5}
Оптимум магнитного поля	4.58 Т
Максимум электронного/волнового КПД	37.1/35.4%
Выходная мощность	5-10 МВт

В дальнейшем предполагается использовать полученные наработки для создания усилителя с аналогичными энергетическими параметрами на основе гироклистронной схемы, ранее успешно отработанной для диапазонов 1 см и 8 мм [12,13].

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 14-29-00192.

Библиографический список

1. Реутова А.Г., Ульмаскулов М.Р., Шарыпов А.К., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И., Белоусов В.И., Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Зотова И.В., Розенталь Р.М., Сергеев А.С. Экспериментальное наблюдение эффекта сверхизлучения при вынужденном встречном рассеянии мощной микроволновой волны накачки сильнооточным релятивистским электронным сгустком субнаносекундной длительности // Письма в ЖЭТФ, 2005, том.82, вып.5, с.295-299.
2. Запевалов В.Е. Гиротрон: пределы роста выходной мощности и КПД // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2006. Т.49. №10. С.864-871.
3. Thumm M. Recent Advances in the Worldwide Fusion Gyrotron Development // IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, v.42, no.3, pp.590-599.
4. Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А. О повышении КПД релятивистского гиротрона // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т.44. №4. С.345 -352.
5. Zaitsev N.I., Ginzburg N.S., Ilyakov E.V., Kulagin I.S., Lygin V.K., Manuilov V.N., Moiseev M.A. , Rosenthal R.M, Zapevalov V.E. , Zavolsky N.A. X-Band, High-Efficiency Relativistic Gyrotron // IEEE trans. on Plasma Sci., 2002, v.30, no.3, p.840-845.
6. Зайцев Н.И., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Лыгин В.К., Моисеев М.А., Нечаев В.Е., Петелин М.И., Розенталь Р.М. Десятигигаваттный импульсный гиротрон с длиной волны 1 см и КПД 50% // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2003, т.46, №10, с.914-918.
7. Планкин О. П., Семенов Е. С. Комплекс программ ANGEL-2DS для моделирования пушки гиротрона. Инструкция для пользователя. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 2011. 32 с.
8. Планкин О. П., Семенов Е. С. Траекторный анализ электронно-оптической системы технологического гиротрона. // Вестник НГУ, серия «Физика». 2013. Т. 8, № 2, с. 44-54.
9. Belousov V.I., Bogdashov A.A., Denisov G.G., Kurbatov V.I., Malygin V.I., Malygin S.A., Orlov V.B., Popov L.G., Solujanova E.A., Tai E.M., Usachov S.V. The test results of the 84 GHz/200 kW/CW gyrotron // 13th Joint Workshop

on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Nizhny Novgorod, Russia, May 17-20, 2004.

[10] Цимринг Ш.Е. Аксиально-симметричные волноводные переходы и трансформаторы // Гиротроны: Сб. научн. тр. / ИПФ АН СССР. Горький, 1989, с.113-132. < <http://www.ipfran.ru/biblio/gir.html>>

[11] Чирков А.В., Денисов Г.Г., Куфтин А.Н., Запевалов В.Е., Малыгин В.И., Моисеев М.А., Корнишин С.Ю. Многочастотный гиротрон с высокоэффективным синтезированным волноводным преобразователем // Письма в ЖТФ. 2007. Т.33. Вып.8. С.71-76.

[12] Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кузиков С.В., Кулагин И.С., Лыгин В.К., Моисеев М.А., Петелин М.И., Шевченко А.С. Импульсный гироклистрон на объёмной моде высокого порядка // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2005. Т.48. №10-11. С.830-834.

[13] Зайцев Н.И., Гвоздев А.К., Запевалов С.А., Кузиков С.В., Мануилов В.Н., Моисеев М.А., Плоткин М.Е.. Экспериментальное исследование мультимегаваттного импульсного гироклистрона // Радиотехника и электроника. 2014, том 59, № 2, с. 179–183.